

Dispositif pour contrôler la température électronique dans un plasma RCE

Le domaine général de l'invention est celui de la production de courants d'ions multichargés dans une chambre à plasma, telle qu'une source  
5 d'ions RCE ou une machine à plasma. L'invention concerne plus particulièrement un dispositif destiné à contrôler la température électronique dans un plasma RCE.

La fonction des « sources d'ions » à Résonance Cyclotron des Electrons (« RCE », ou « ECR » en anglais) est de produire, d'une part, des  
10 intensités ioniques allant du  $\mu\text{A}$  au  $\text{mA}$ , et d'autre part une gamme d'états de charge étendue. Les utilisateurs de ces sources demandent actuellement plusieurs  $\text{mA}$  d'ions de faible charge électrique, comme  $\text{B}^{1+}$  à  $\text{B}^{3+}$  (servant d'implanteurs), environ 1  $\text{mA}$  d'ions moyennement chargés, comme  $\text{Ar}^{8+}$ ,  $\text{Ar}^{12+}$  ou  $\text{Pb}^{27+}$  (alimentant des accélérateurs pour la physique nucléaire), et quelques  $\mu\text{A}$   
15 d'ions ayant des charges très élevées, comme  $\text{Ar}^{16+}$ ,  $\text{Ar}^{17+}$  ou  $\text{Ar}^{18+}$  (alimentant des accélérateurs pour la physique nucléaire ou la physique atomique).

La fonction des « machines à plasma » RCE est de produire des ions qui ne sont pas extraits de la machine. Ces ions sont par exemple utilisés pour faire des dépôts de matériaux sur des substrats.

20 Dans une chambre à plasma RCE, le plasma (ensemble d'ions et d'électrons) est confiné dans une enceinte plongée dans une configuration magnétique résultant de la superposition de deux champs magnétiques, l'un axial et l'autre radial, dans le but d'éviter les fuites du plasma. Tous les électrons du plasma oscillent sur des lignes de champ magnétique qui sont  
25 facilement calculables par différent codes (voir par exemple l'article de A. Girard *et al.* intitulé « *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources: Experiments and Theory* », Actes du 12ème Séminaire International sur les sources d'ions ECR, 25-27 avril 1995, Riken, Japon).

Pour produire des ions de charge  $q+$ , un plasma RCE utilise le  
30 principe de « l'épluchage » répété des atomes qui résulte des collisions entre ces atomes et des électrons énergétiques. On estime empiriquement que

l'énergie requise pour ces électrons doit être égale à environ 3 fois le potentiel d'ionisation de l'ion  $X^{(q-1)+}$ . Ainsi, le potentiel d'ionisation des atomes d'argon étant de 16 eV, l'énergie électronique optimale pour produire des ions  $Ar^+$  est d'environ 100 eV ; pour produire des ions  $Ar^{8+}$ , il faut des électrons ayant une énergie voisine de 500 eV, alors que pour obtenir des ions  $Ar^{18+}$ , les électrons doivent avoir une énergie de l'ordre de 15 keV.

Les intensités ioniques requises par les utilisateurs étant toujours croissantes, il est nécessaire de perfectionner les sources d'ions RCE. Plusieurs voies ont été explorées dans ce but :

10           - augmentation de la fréquence de chauffage des électrons : on augmente de la sorte la densité des électrons du plasma, selon une loi bien connue en physique des plasmas ;

             - optimisation du confinement des électrons et des ions du plasma : beaucoup de travaux ont été réalisés, voir par exemple l'article de S. Gammino *et al.* intitulé « *Operation of the Serse superconducting ECR ion source at 28 GHz* » (Review of Scientific Instruments, vol. 72, n° 11, p. 4090, novembre 2001) ; dans cet article sont exposées des lois d'échelles liées au confinement du plasma ;

             - optimisation de l'injection de micro-ondes : voir par exemple le brevet FR 2 681 186 ; et

20           - diminution de la température des ions par injection d'un gaz plus léger que le gaz à ioniser (technique du mélange de gaz) : voir l'article de A. Drentje intitulé « *Techniques to improve highly charged ions output from ECRISs* » (Actes du 15ème Séminaire International sur les sources d'Ions ECR, Université de Jyväskylä, Finlande, juin 2002).

25           Des mesures de température électronique  $T_e$  ont été effectuées. Il a été montré (voir par exemple l'article de A. Girard *et al.* cité ci-dessus) que, dans un plasma RCE, il existe à la fois une population d'électrons « très chauds » ( $T_e > 50$  keV), une population d'électrons « chauds » ( $1 \text{ keV} < T_e < 50$  keV) et une population d'électrons « froids » ( $T_e < 1$  keV). En fait, seuls les  
30 électrons chauds ayant une température inférieure à 20 keV sont utiles dans un plasma RCE (par exemple, pour obtenir des ions  $Ar^{18+}$ , il faut, comme indiqué

ci-dessus, des électrons de 15 keV environ). Or l'on trouve couramment, dans un plasma RCE, des électrons d'énergie supérieure à 100 keV : ces électrons sont tout à fait inefficaces du fait de leur énergie excessivement supérieure à l'énergie optimale.

5 L'invention concerne donc une chambre à plasma RCE comprenant une enceinte plongée dans une configuration magnétique résultant de la superposition de deux champs magnétiques, l'un axial et l'autre radial, dans laquelle la configuration des trajectoires électroniques dépend de ladite configuration magnétique, ladite chambre à plasma RCE étant remarquable en  
10 ce qu'elle comprend au moins un modérateur dont la position et la forme sont choisies en fonction de ladite configuration magnétique de manière à ce que ledit modérateur fasse obstacle aux électrons dont l'énergie est supérieure à une énergie prédéterminée.

Ainsi, selon leur position dans la chambre à plasma ainsi que leur  
15 forme, ces modérateurs vont stopper les électrons plus ou moins énergétiques, ce qui permet de réduire le nombre des électrons jugés trop chauds, voire de les supprimer complètement, en plaçant des obstacles sur leur parcours. Notamment, on peut, en couvrant avec les modérateurs selon l'invention une zone plus ou moins large dans la chambre à plasma, déterminer la plage  
20 d'énergie des électrons auxquels il est fait obstacle.

Grâce à l'invention, on peut contrôler la température électronique de manière à ce qu'elle coïncide avec les potentiels d'ionisation des ions concernés. En outre, lorsque les ions ou les électrons du plasma viennent toucher les modérateurs, il se crée des électrons secondaires de basse énergie  
25 (quelques eV) ; ces électrons seront alors immédiatement chauffés et contribueront avantageusement au processus d'ionisation.

Selon des caractéristiques particulières de l'invention, la position et le nombre desdits modérateurs sont choisis en fonction de l'énergie des électrons et du nombre d'électrons auxquels l'on veut faire obstacle.

30 Grâce à ces dispositions, on peut supprimer les électrons indésirables en plus ou moins grande quantité.

Selon d'autres caractéristiques particulières de l'invention, les matières constituant ces modérateurs sont choisies en fonction de leur aptitude à produire des électrons secondaires lorsqu'elles sont soumises à des collisions avec des électrons de haute énergie.

5           En effet, selon les matières utilisées pour ces modérateurs, le nombre et l'énergie des électrons secondaires ainsi produits peuvent être plus ou moins importants. On peut donc ainsi doser l'effet de ces électrons secondaires sur la production d'ions.

10           Selon encore d'autres caractéristiques particulières de l'invention, le modérateur comprend au moins une partie active, et un anneau encerclant le plasma.

On obtiendra ainsi un dispositif robuste, et qui permet de placer commodément lesdites parties actives dans la meilleure position possible en fonction de la configuration magnétique concernée.

15           L'invention vise également une source d'ions RCE et une machine à plasma RCE comprenant, avantageusement, l'une quelconque des chambres à plasma décrites succinctement ci-dessus.

20           D'autres aspects et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée, que l'on trouvera ci-dessous, de modes particuliers de réalisation donnés à titre d'exemples non limitatifs. Cette description se réfère aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe d'une chambre à plasma,
- les figures 2a et 2b sont des vues en coupe d'une chambre à plasma équipée d'un modérateur selon l'invention placé dans une zone sans plasma de la chambre, avec deux formes différentes de modérateurs,
- la figure 3 est une vue en coupe d'une chambre à plasma équipée d'un modérateur selon l'invention placé dans une zone de fuite du plasma,
- la figure 4 est une vue en coupe d'une chambre à plasma équipée d'un modérateur selon l'invention placé dans la zone à plasma chaud de la
- 30 chambre,
- la figure 5 représente un exemple de structure pour un modérateur selon l'invention, et

- la figure 6 est une vue en perspective d'une chambre à plasma équipée de modérateurs selon la figure 5.

On va décrire à présent divers modes de réalisation de l'invention.

5 Comme indiqué ci-dessus, le profil magnétique d'une chambre à plasma RCE est donné par la superposition de deux champs magnétiques (axial et radial). La structure de ces champs magnétiques détermine la forme du plasma, et est donc choisie en fonction de l'application visée. Par exemple, lorsque l'on cherche à donner au plasma une forme aussi cylindrique que  
10 possible, on crée un champ magnétique radial à  $2n$  pôles ; la zone dans laquelle circulent les électrons présente alors une forme d'étoile à  $n$  branches.

La **figure 1** est une vue en coupe d'une chambre à plasma 1, dans le cas d'un confinement radial obtenu au moyen de six pôles magnétiques 2a à 2f (auquel cas la zone dans laquelle circulent les électrons, non représentée, a la  
15 forme d'une étoile à trois branches).

On distingue, en particulier, trois types de zones dans la chambre à plasma 1 :

- une zone centrale 3 du plasma (comprenant essentiellement des électrons « chauds » et des ions « froids »),
- 20 - des zones de fuite 4 du plasma, et
- des zones sans plasma 5.

Il est à noter que l'on peut trouver des électrons très chauds dans toutes ces zones, y compris dans les zones sans plasma 5.

Comme indiqué plus haut, on dispose aujourd'hui des outils  
25 théoriques nécessaires pour déterminer les trajectoires électroniques (ainsi que la forme globale du plasma) en fonction de l'application visée ; on peut en effet procéder comme suit :

- a) on calcule la configuration du champ magnétique axial et du champ magnétique radial,
- 30 b) on calcule la configuration magnétique totale, et
- c) on obtient l'enveloppe des lignes de champ magnétique où vont s'enrouler les électrons lors de leur parcours dans le plasma RCE.



Une fois les trajectoires électroniques déterminées de la sorte, on peut déterminer la position, la forme et les matériaux requis pour les modérateurs selon l'invention.

Les **figures 2a et 2b** sont des vues en coupe d'une chambre à plasma 1 équipée d'un modérateur 100 placé dans une zone sans plasma 5 de la chambre, avec deux formes différentes de modérateurs. La forme relativement plus large du modérateur de la figure 2b permet d'intercepter des électrons sur un nombre supérieur de trajectoires.

La **figure 3** est une vue en coupe d'une chambre à plasma 1 équipée d'un modérateur 100 placé dans une zone de fuite 4 du plasma, et la **figure 4** est une vue en coupe d'une chambre à plasma 1 équipée d'un modérateur 100 interceptant la zone centrale 3 de la chambre.

Sur chacune des figures 2a, 2b, 3 et 4, on n'a représenté, à titre d'exemple, qu'un seul modérateur 100. Mais il va de soi qu'il faudra dans de nombreux cas utiliser plusieurs modérateurs 100 pour obtenir la température électronique souhaitée. En particulier, lorsque le champ magnétique radial est constitué de  $2n$  pôles, on munira de préférence le modérateur 100 de  $n$  parties actives 7 dont chacune sera placée respectivement dans une des  $n$  branches formées par les trajectoires électroniques.

On notera par ailleurs que, bien que les électrons de haute énergie soient présents dans toute la chambre à plasma 1, leur concentration est évidemment maximale dans la zone centrale 3, où les températures du plasma sont elles-mêmes maximales. Pour une efficacité optimale des modérateurs 100, on cherchera donc à les placer aussi près que possible de cette zone centrale 3, mais il faudra tenir compte, notamment, de la température pouvant être supportée par la structure du modérateur 100.

La **figure 5** représente un exemple de structure pour un modérateur selon l'invention destiné à être placé dans une chambre à plasma comprenant une configuration magnétique hexapolaire. Cette structure comporte trois parties actives 7, dont chacune est en forme de barreau cylindrique destiné à être placé radialement dans un plan transversal de la chambre à plasma 1. Une extrémité du barreau va pointer vers la zone centrale 3 de la chambre,

cependant que l'autre extrémité est fixée sur une autre partie du modérateur 100 constituée par un anneau 6 destiné à encercler le plasma.

Selon un autre mode de réalisation (non représenté), la partie active 7 du modérateur 100 est fixée, aux fins de maintien mécanique, sur une partie 5 intermédiaire qui est elle-même fixée sur un anneau 6 du type utilisé dans le mode de réalisation précédent. Par exemple, la partie intermédiaire peut être constituée d'une tige-support, et la partie active 7, qui peut avoir la forme d'un barreau ou d'un disque ou encore d'une bille, est montée au bout de cette tige-support.

10 L'épaisseur des anneaux 6 doit être suffisante pour assurer un maintien suffisamment rigide des parties actives, mais ne doit pas être trop grande, afin d'éviter de perturber le plasma. Par exemple, une épaisseur de 2 à 5 mm convient en général pour une chambre à plasma de 100 mm de diamètre.

15 L'homme du métier choisira des parties actives 7 de plus ou moins grande taille (par exemple le diamètre des barreaux de la figure 5) en fonction, en particulier, du taux de production d'électrons secondaires recherché lors de l'impact des électrons très chauds sur ces parties actives 7 ; les électrons secondaires ainsi produits sont généralement des électrons froids. S'il constate  
20 par exemple qu'un nombre trop important d'électrons chauds sont présents, il augmentera la taille des parties actives 7 en conséquence.

On notera que, en fonctionnement, l'extrémité de la partie active 7 située au plus près de la zone centrale 3 du plasma s'érode à son contact, de sorte que sa forme en sera affectée. Par exemple, si la partie active 7 est  
25 constituée par un barreau dont l'extrémité est, au départ, plate, et si le plasma a, au niveau de cette extrémité, une forme concave, l'extrémité du barreau prendra en cours de fonctionnement une forme concave.

Les diverses parties constituant les modérateurs 100 peuvent être faites de diverses matières.

30 Les anneaux 6 doivent, évidemment, être faits de matières qui ne risquent pas de fondre en cours de fonctionnement ; de plus, ces matières doivent de préférence ne pas dégager de gaz. Ces anneaux 6 peuvent par

exemple être en métal ou en céramique (telle que l'alumine ou l'oxyde de zirconium).

Si l'on utilise des parties intermédiaires telles que des tiges-soutiens, celles-ci seront soumises aux mêmes contraintes de matériaux que les anneaux

5 6.

Enfin les parties actives 7 doivent, de préférence, être aptes à supporter les hautes températures présentes dans le plasma (alors que les autres parties des modérateurs 100, qui sont destinées au support mécanique des parties actives 7, et sont, d'une part, plus éloignées des parties chaudes du plasma et d'autre part protégées dans une certaine mesure par ces parties actives 7, requièrent moins de précautions à cet égard). De préférence, les parties actives 7 seront en un matériau réfractaire, tel que le tungstène, le tantale ou le molybdène ; mais elles pourront également être en céramique (telle que l'alumine ou l'oxyde de zirconium ou l'oxyde de thorium), ou encore être

10 15 entièrement métalliques.

Selon les matériaux choisis pour les modérateurs, le nombre et l'énergie des électrons secondaires produits lors de l'impact des électrons très chauds seront différents. L'homme du métier choisira donc les matériaux adaptés à ses besoins, après quelques tests *in situ* si nécessaire.

20 La **figure 6** est une vue en perspective d'une chambre à plasma 1 à confinement radial hexapolaire, équipée d'un certain nombre de modérateurs 100 du type illustré sur la figure 5. Comme on le voit sur la figure 6, les barreaux 7 sont contenus dans des zones 8, 8', 8'' où circulent des électrons indésirables.

25



## REVENDICATIONS

1. Chambre à plasma RCE (1) comprenant une enceinte plongée  
5 dans une configuration magnétique résultant de la superposition de deux  
champs magnétiques, l'un axial et l'autre radial, dans laquelle la configuration  
des trajectoires électroniques dépend de ladite configuration magnétique,  
caractérisée en ce qu'elle comprend au moins un modérateur (100) dont la  
10 position et la forme sont choisies en fonction de ladite configuration magnétique  
de manière à ce que ledit modérateur (100) fasse obstacle aux électrons dont  
l'énergie est supérieure à une énergie prédéterminée.

2. Chambre à plasma RCE selon la revendication 1, caractérisée en  
ce que la position et le nombre desdits modérateurs (100) sont choisis en  
fonction de l'énergie des électrons et du nombre d'électrons auxquels l'on veut  
15 faire obstacle.

3. Chambre à plasma RCE selon la revendication 1 ou la  
revendication 2, caractérisée en ce que les matières constituant ces  
modérateurs (100) sont choisies en fonction de leur aptitude à produire des  
électrons secondaires lorsqu'elles sont soumises à des collisions avec des  
20 électrons de haute énergie.

4. Chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des  
revendications précédentes, caractérisée en ce que le champ magnétique  
radial est constitué de  $2n$  pôles, et en ce que le modérateur (100) comporte  $n$   
parties actives (7) dont chacune est placée respectivement dans une des  $n$   
25 branches formées par les trajectoires électroniques.

5. Chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des  
revendications précédentes, caractérisée en ce que ledit modérateur (100)  
comprend au moins une partie active (7), et un anneau (6) encerclant le  
plasma.

30 6. Chambre à plasma RCE selon la revendication 5, caractérisée en  
ce que ladite partie active (7) a la forme d'un barreau cylindrique placé  
radialement dans un plan transversal de la chambre à plasma (1), une

extrémité du barreau pointant vers la zone centrale (3) de la chambre à plasma (1), cependant que l'autre extrémité du barreau est fixée sur ledit anneau (6).

7. Chambre à plasma RCE selon la revendication 5, caractérisée en ce que ladite partie active (7) est montée au bout d'une tige-support, ladite tige-support étant elle-même fixée sur ledit anneau (6).

8. Chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisée en ce qu'au moins un modérateur (100) comprend des parties métalliques.

9. Chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisée en ce qu'au moins un modérateur (100) comprend des parties en céramique.

10. Source d'ions RCE comprenant une chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

11. Machine à plasma RCE comprenant une chambre à plasma RCE selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

Fig.1

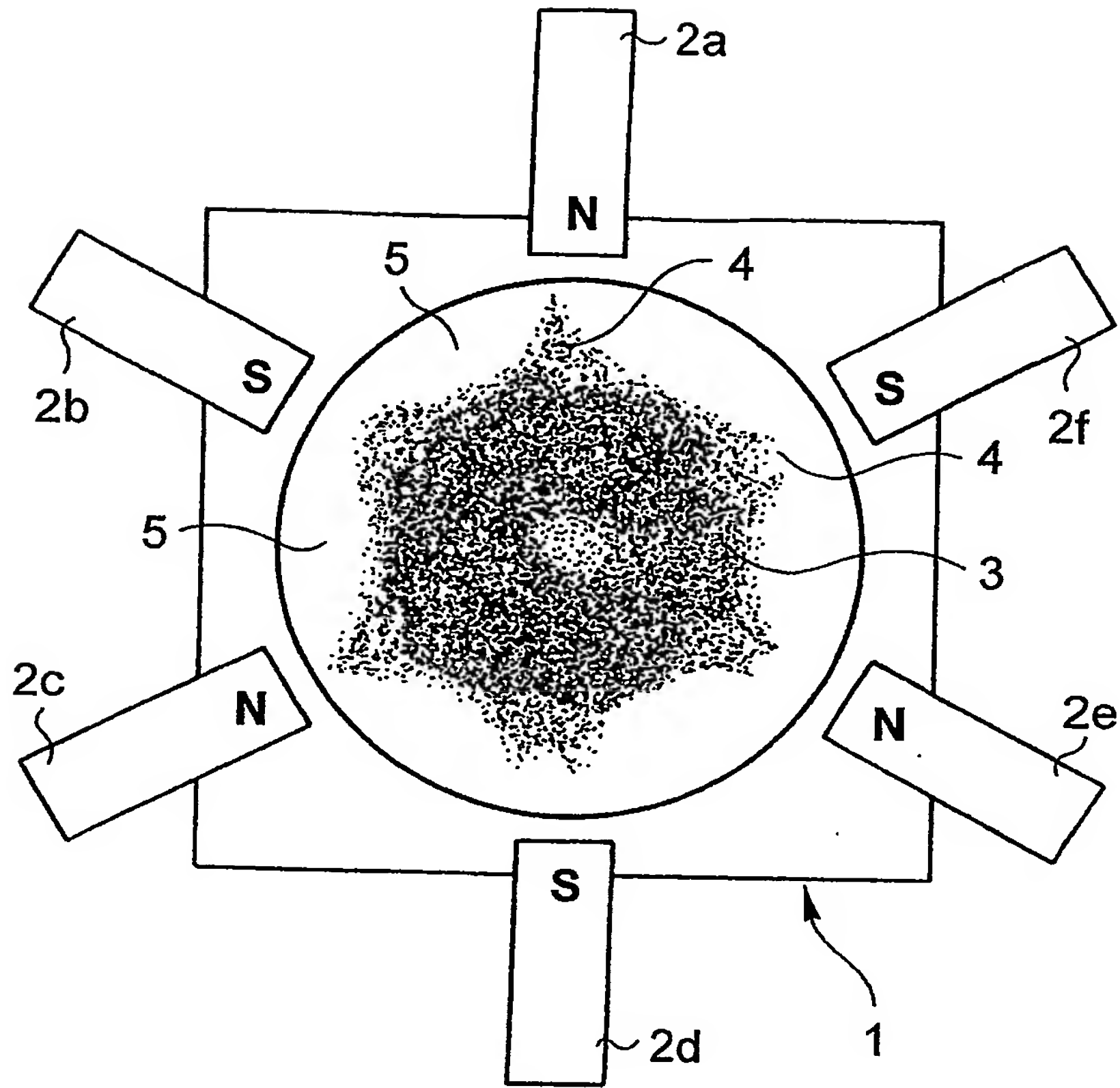
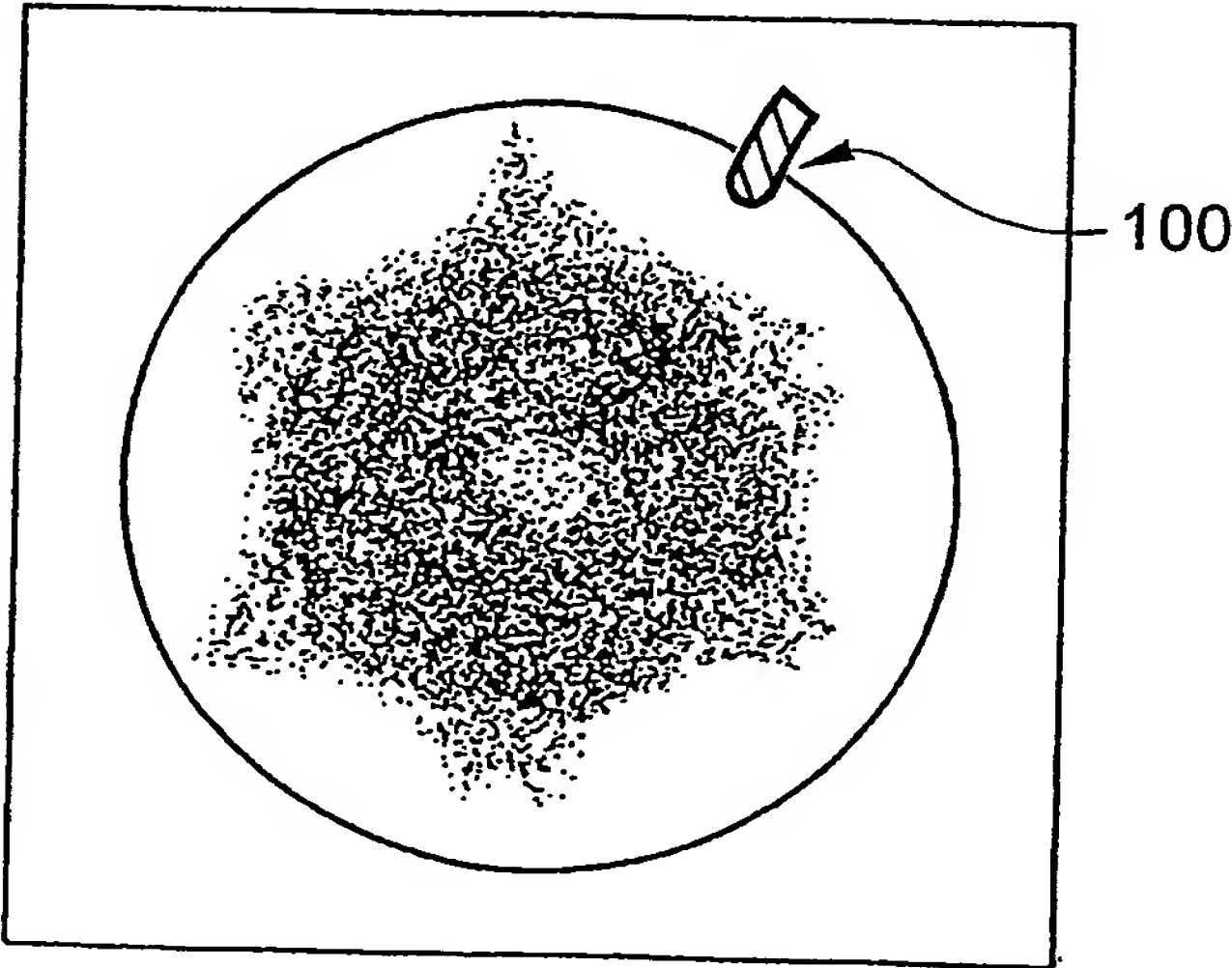


Fig.2a



BEST AVAILABLE COPY

Fig.2b

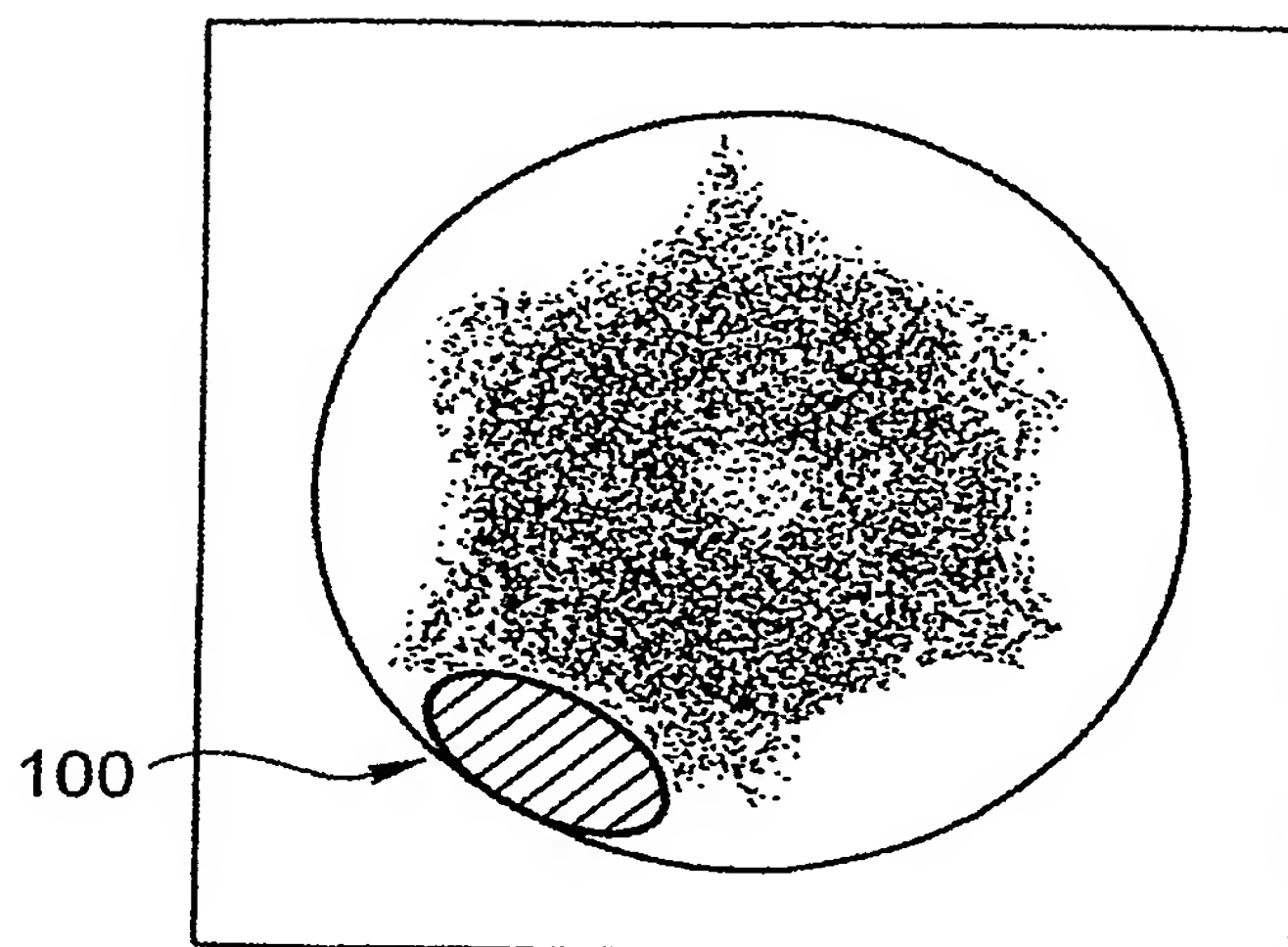


Fig.3

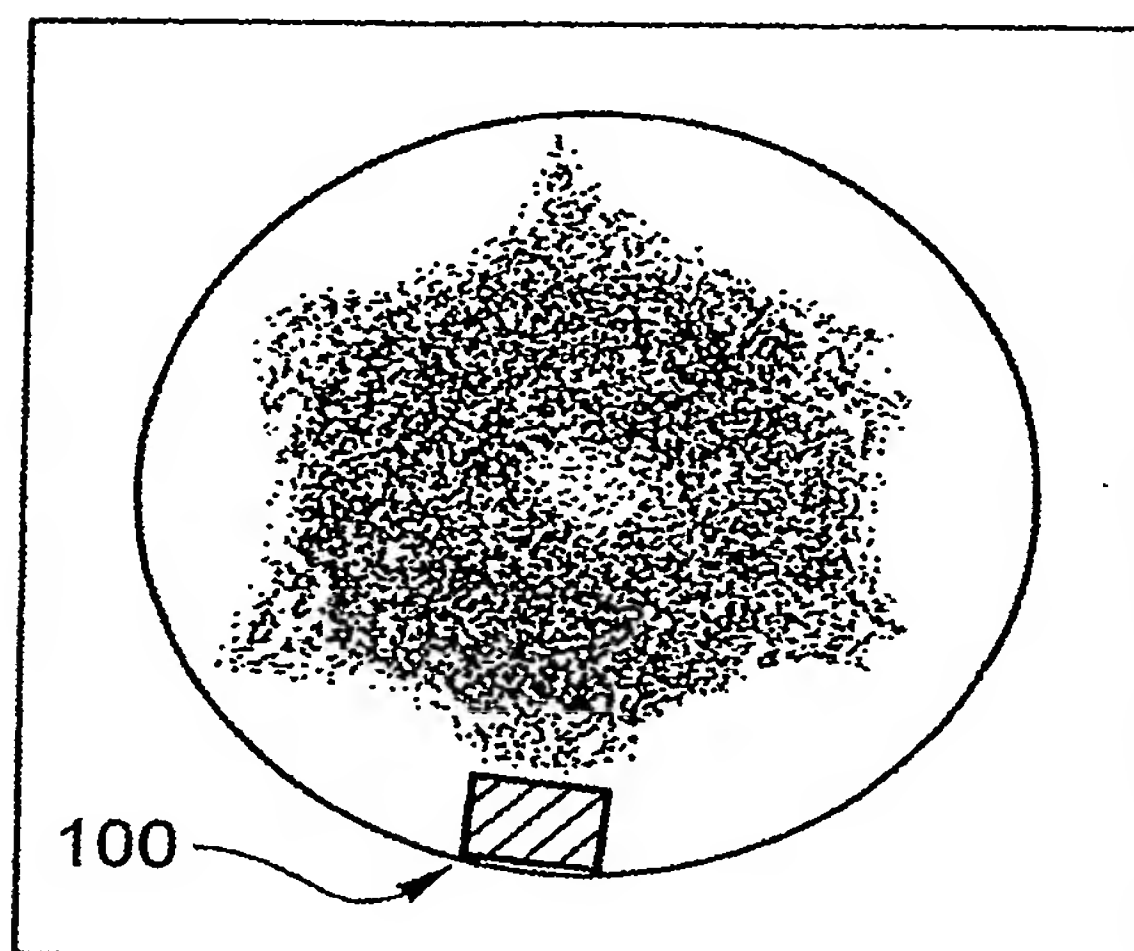


Fig.4

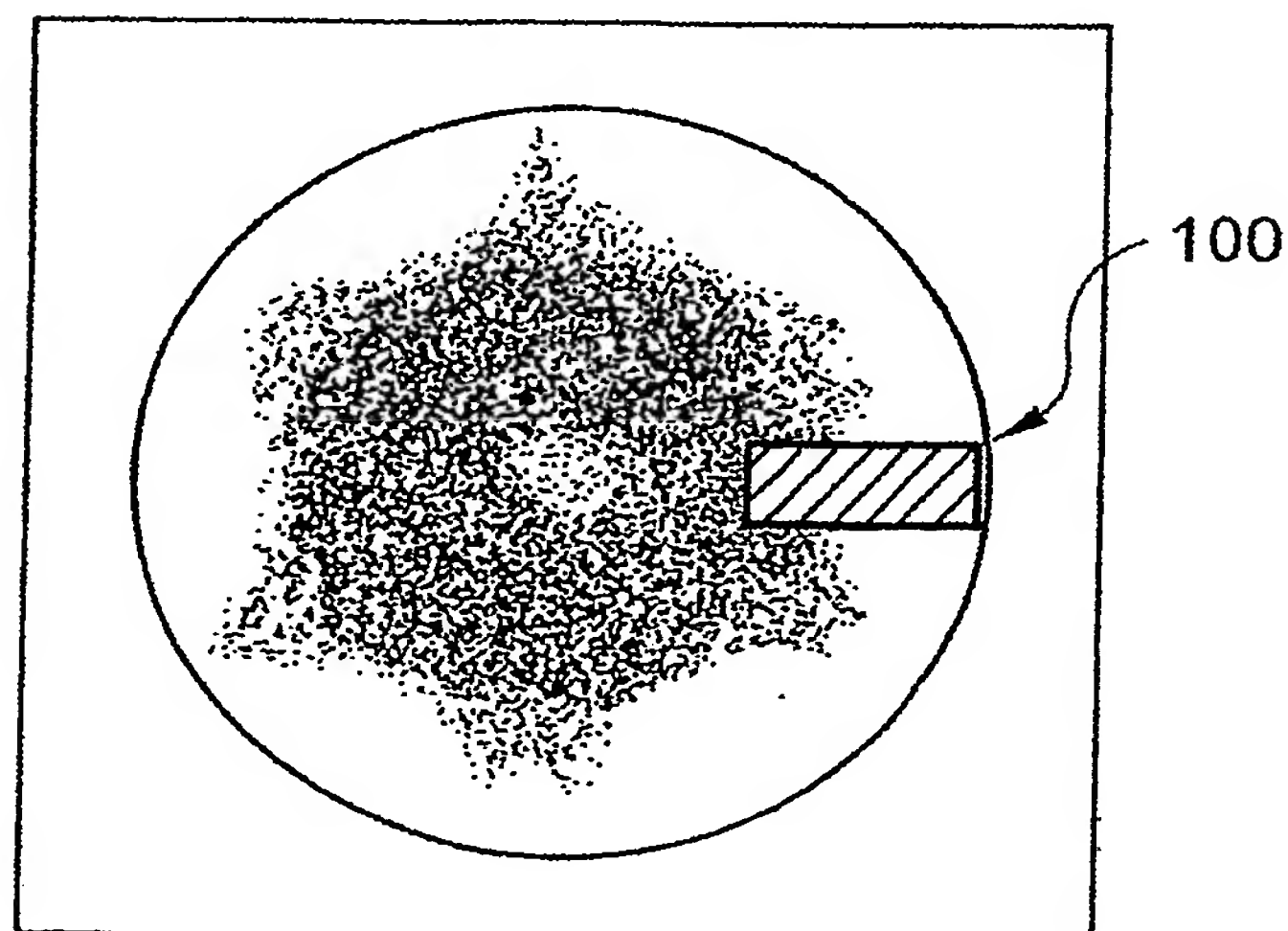
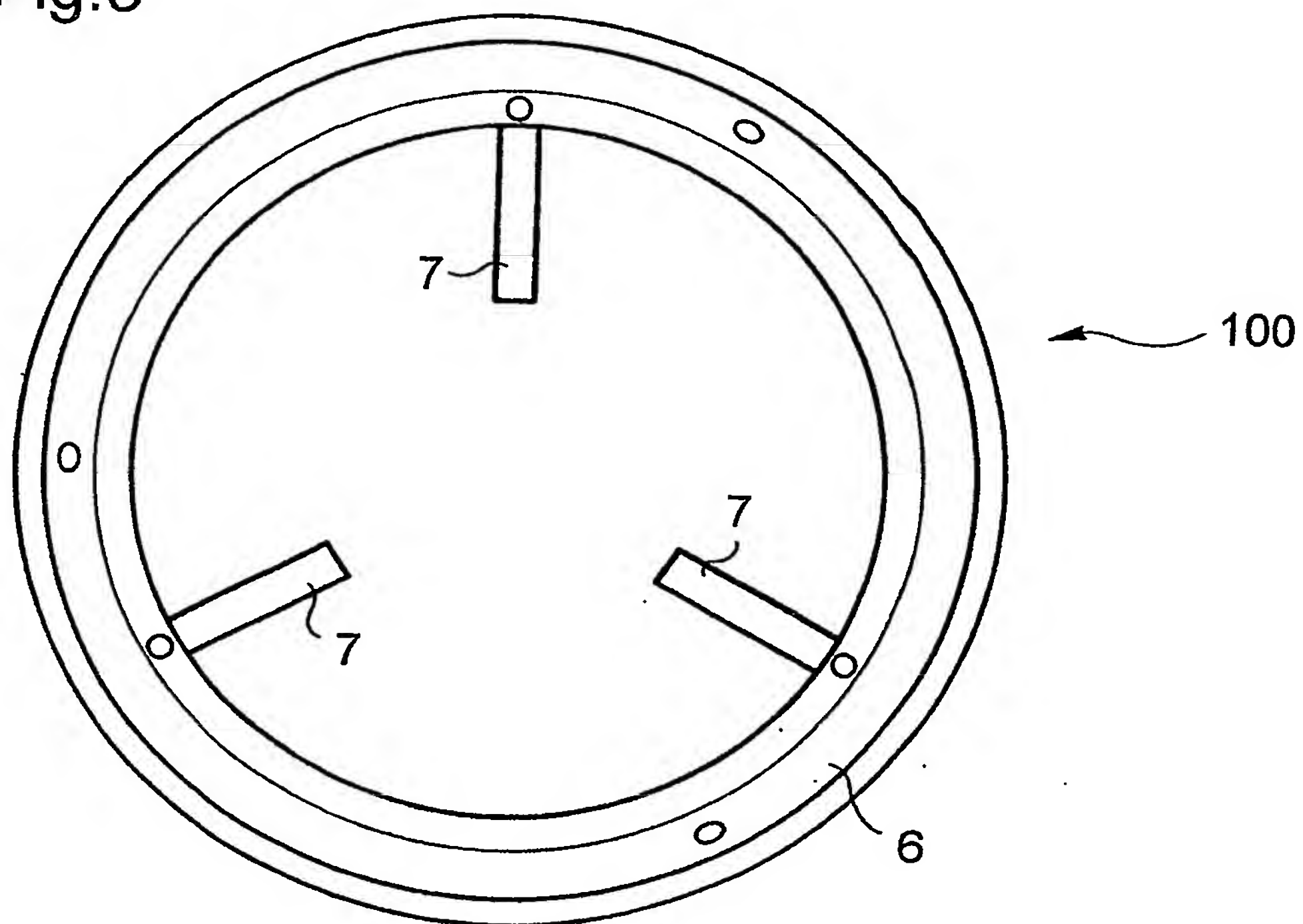


Fig.5



**Fig.6**

